

## FLUJOMETRÍAS DINÁMICAS MEDIANTE CFD

Ezequiel J. López†y Norberto M. Nigro†

†Centro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería (CIMEC),  
INTEC-CONICET-UNL, Güemes 3450, 3000 Santa Fe, Argentina  
email: ejlopez@ceride.gov.ar, nnigro@intec.unl.edu.ar

**Key Words:** Flujometría virtual, ALE, Movimiento de mallas.

**Abstract.** *En este trabajo se muestra un nuevo método útil para ensayar distintas formas geométricas de tapas de cilindros y cámaras de combustión teniendo en cuenta el movimiento del flujo de gases alrededor de los elementos del motor incorporando el movimiento de los órganos mecánicos. Esta forma permite visualizar las diferencias entre este tipo de ensayo y uno de flujometría convencional (estática), pudiendo tener en cuenta las diferencias para poder entender mejor la metodología a seguir en el diseño de estos elementos. Para llevar a cabo esta tarea se usa una técnica ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) implementada sobre un solver de flujo de fluidos basado en elementos finitos desarrollado en CIMEC.*

*Para la técnica ALE se requiere deformar la malla acorde a los movimientos que posee el contorno de la misma. Para tal fin, en este trabajo se presenta una estrategia basada en optimizar la calidad de la malla usando la minimización de la distorsión de la misma.*

*Se muestran animaciones del flujo en un dispositivo con funcionamiento semejante al de un flujómetro, como así también las curvas que surgen de la flujometría y una comparación entre los resultados obtenidos en forma estática y dinámica.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de simulación computacional están siendo utilizadas hoy en día en una amplia variedad de problemas relacionados con la ingeniería aplicada a los automóviles. En particular, existe un especial interés en su uso en motores de combustión interna para predecir performance, emisiones, etc. Los modelos empleados para la simulación de motores pueden clasificarse en dos grandes grupos: modelos 0 D (o puntuales) - 1 D y modelos multidimensionales. Los simuladores que emplean modelos 0-1 D son apropiados para estudiar los motores en forma global debido a su bajo costo computacional, aunque no son aptos para obtener información detallada del flujo en partes específicas de la máquina. Por otro lado, los modelos multidimensionales aportan detalles del flujo, lo cual los hace una herramienta apropiada para su aplicación en el diseño de componentes del motor; sin embargo, su alto costo computacional vuelve inviable su utilización para modelar la totalidad del motor. Es por ello que ambos enfoques de simulación se emplean en forma complementaria. Los modelos 0-1 D requieren en general coeficientes de ajuste, los cuales son obtenidos en forma experimental o a través del empleo de los modelos multidimensionales. Uno de nuestros objetivos es poder sintetizar resultados de flujos multidimensionales para mejorar los modelos 0-1 D disponibles actualmente.

La simulación multidimensional de un motor de combustión interna puede clasificarse como un problema de interacción fluido-estructura, donde la estructura no se mueve o deforma por acción del fluido. En este caso, las fronteras del dominio que ocupa el fluido se mueven rígidamente por una ley impuesta. La resolución de problemas de fluidodinámica computacional en dominios con fronteras móviles suele hacerse empleando la técnica Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE). Para la aplicación de este método es necesario disponer de un algoritmo capaz de mover la malla siguiendo el movimiento del contorno, aspecto comúnmente denominado Computational Mesh Dynamics (CMD). En la literatura reciente se han propuesto una gran variedad de enfoques para tratar este tema.<sup>1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11</sup> Si bien la determinación del movimiento de la malla constituye un problema artificial, debe resolverse adecuadamente, demandándose de una técnica de movimiento de mallas criterios como los listados a continuación:

- minimizar el número de remallados necesarios;
- mantener la calidad de malla a lo largo del tiempo de simulación;
- funcionar correctamente para mallas no estructuradas y con grandes gradientes de refinamiento;
- no contener parámetros dependientes del problema;
- funcionar tanto para 2 D como para 3 D.

En este trabajo empleamos una estrategia de movimiento de malla basada en un problema de optimización, donde las coordenadas de los nodos corresponden al punto óptimo de un funcional relacionado con la calidad de los elementos para una posición determinada de la frontera.

El resto del trabajo está organizado de la siguiente forma: comienza con una presentación resumida de las ecuaciones de gobierno para flujo incompresible y el modelo de turbulencia empleado. La siguiente sección trata acerca de la metodología propuesta para resolver el movimiento de la malla. Luego son presentadas una geometría estática y una dinámica en un flujo axisimétrico. La siguiente sección muestra algunos resultados preliminares de una geometría estática para el motor MWM. Finalmente se encuentran las conclusiones y trabajos a futuro.

## 2. ECUACIONES DE GOBIERNO

El objetivo principal de este trabajo está enfocado a realizar geometrías virtuales “en frío”, es decir, considerando una temperatura constante en el orden de las que se verifican en el proceso de admisión en el motor. Además, durante la admisión la velocidad del fluido no excede los 200 m/s si el sistema está bien diseñado. Entonces, una buena aproximación para calcular la inducción de masa dentro de un cilindro es considerar que el flujo es incompresible.

De este modo, el movimiento del fluido está gobernado por las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo incompresible, las cuales pueden escribirse del siguiente modo siguiendo una descripción ALE

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{u} &= \mathbf{0} \quad \text{en } \Omega(t) \times (0, T) \\ \rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} - \hat{\mathbf{u}}) \cdot \nabla \mathbf{u} \right) - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} &= \mathbf{0} \quad \text{en } \Omega(t) \times (0, T) \end{aligned} \quad (1)$$

con  $\rho$  y  $\mathbf{u}$  la densidad y velocidad del fluido respectivamente, y  $\boldsymbol{\sigma}$  el tensor de tensiones dado por

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma} &= -p\mathbf{I} + 2\mu_{eff}\boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{u}) \\ \boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{u}) &= \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \end{aligned} \quad (2)$$

donde  $p$  es la presión y  $\mu_{eff} = \rho\nu_{eff}$  la viscosidad dinámica efectiva proporcional a la viscosidad cinemática efectiva, la cual se define más adelante.  $\mathbf{I}$  representa la matriz identidad y  $\boldsymbol{\epsilon}$  el tensor de deformación. Además,  $\hat{\mathbf{u}}$  es la velocidad de la malla debida al movimiento de las fronteras.

Para modelar la turbulencia es empleada la técnica de Large Eddy Simulation (LES), en particular el modelo de Smagorinsky. En este modelo de viscosidad de remolino se define la viscosidad cinética turbulenta como

$$\nu_t = C_s \Delta h^2 \sqrt{\boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{u}) : \boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{u})} \quad (3)$$

con  $C_s = 0,18$  la constante de Smagorinsky,  $\Delta$  una función introducida para reducir la cantidad de viscosidad turbulenta en la vecindad de paredes sólidas inmersas en el fluido, y  $h$  el tamaño de la malla.

En cuanto a las condiciones de contorno para las aplicaciones particulares que nos interesan resolver, se aplica condición de no deslizamiento sobre paredes sólidas y, en las entradas (salidas) es impuesta la presión y velocidad tangencial a la superficie de entrada (salida) nula.

Para la resolución de las ecuaciones fue utilizado un código multi-física orientado a objetos aplicable a flujos de fluidos viscosos compresibles e incompresibles,<sup>12,13,14</sup> de una única fase o multifase (<http://venus.ceride.gov.ar/petscfem>).<sup>15</sup> Para el caso de flujo incompresible este código se basa en una formulación por elementos finitos estabilizada con SUPG-PSPG.<sup>16</sup> El sistema no lineal es resuelto mediante un esquema tipo Newton,<sup>17,18</sup> y para la resolución del sistema lineal que surge en cada iteración de Newton se emplea una técnica de descomposición de dominios preconditionada.

### 3. ESTRATEGIA DE MOVIMIENTO DE LA MALLA

El movimiento de la malla en la presente aplicación está basado en la solución de un problema de optimización, donde la función costo se define en términos de algún indicador de la calidad de la malla. La topología de la malla, es decir, las conectividades de los elementos, es mantenida fija. Así, para una posición dada de la frontera del dominio, la estrategia posiciona los nodos interiores en forma tal de minimizar (o maximizar) un funcional  $F = F(\{x_j^\alpha\})$  que represente la distorsión (o calidad) de la malla, siendo  $x_j^\alpha$  la  $\alpha$ -ésima coordenada del nodo  $j$  y  $\{x_j^\alpha\}$  el conjunto de las coordenadas nodales de la malla.

El funcional que se plantea en este trabajo es una extensión del presentado por los autores,<sup>19</sup> donde se propone un funcional basado en un índice de calidad geométrico  $q$  válido para elementos simples (triángulos y tetraedros en dos y tres dimensiones, respectivamente). Este indicador de calidad se define como el cociente entre el área o volumen del elemento  $V$  y la suma de sus lados  $l$  elevados a un exponente dado por la dimensión del espacio  $nsd$ , escalado por una constante  $C$  de forma tal de asumir un valor unitario para elementos equiláteros. Resulta de este modo un indicador adimensional que puede escribirse

$$q = \frac{CV}{\sum_i l_i^{nsd}} \quad (4)$$

con  $C = 4\sqrt{3}$  para triángulos y  $C = 36\sqrt{2}$  para tetraedros. Con esta definición,  $q$  puede adoptar valores comprendidos en el intervalo  $[0, 1]$ .

Este indicador de calidad sólo tiene en cuenta la forma del elemento y no su tamaño. Por este motivo, proponemos adicionar al funcional original un término que involucre el volumen o tamaño del elemento. Entonces, la forma empleada en este trabajo para el funcional resulta

$$F = C_v \left( \frac{V}{V_{ref}} - 1 \right)^m + C_q q^n. \quad (5)$$

donde  $V_{ref}$  es el volumen deseado para el elemento, y  $C_v$  y  $C_q$  permiten asignar distintos pesos en el funcional a los términos de tamaño y forma, respectivamente. El exponente  $m$  debe ser par y, para formular el problema como uno de minimización, debe ser  $n < 0$  de forma tal que

la inversa de  $q$  se comporte como una medida de la distorsión del elemento. Variando el valor de estos exponentes es posible usar diferentes normas discretas para medir la distorsión y el tamaño de los elementos, por ejemplo,  $n = 2$  representa la norma euclídea y  $n \rightarrow \infty$  representa la norma del máximo.

El hecho de emplear la inversa del indicador de calidad  $q$  como una medida de la distorsión del elemento, implica tener un funcional discontinuo cuando  $q = 0$ . Por este motivo, la técnica propuesta no es aplicable a mallas con elementos inicialmente invertidos. Es decir, no puede recuperarse una malla válida (sin ningún elemento invertido) a partir de una malla no válida aplicando esta estrategia. Es por ello que el algoritmo no lineal debe empezar a iterar a partir de una malla válida para que el método funcione.

#### 4. FLUJÓMETRO AXISIMÉTRICO

El primer ejemplo numérico que se plantea consiste en la resolución de un dispositivo con geometría axisimétrica y funcionamiento comparable al de un flujómetro. Este caso permite atacar un problema relacionado con nuestro objetivo principal (resolver la flujometría en un motor de combustión interna) dado que posee una válvula móvil, asemejándose el test propuesto al proceso de admisión en un motor. Además, la simplificación introducida por la axisimetría permite testear las herramientas desarrolladas en un caso 2 D antes de atacar problemas más complejos en 3 D.

La Figura 1 representa la geometría empleada siendo sus medidas principales, de acuerdo con esa figura, las siguientes:  $r_v = 12.8$  mm,  $R = 37.5$  mm,  $H = 80$  mm y  $h = 30.4$  mm. El experimento consiste en imponer una diferencia de presión entre la entrada y la salida del dispositivo y determinar el caudal que se establece. Con el objetivo de comparar caudales, esta flujometría es realizada tanto en forma estática, es decir con la válvula fija en una posición correspondiente a una alzada determinada, como dinámica, donde se impone un movimiento a la válvula mediante una ley predefinida.

##### 4.1. Flujometría axisimétrica estática

Fueron realizadas flujometrías estáticas para alzadas de la válvula comprendidas entre 1 mm. y la alzada máxima de 9.92 mm., con incrementos de 1 mm. Entre la entrada y la salida fue impuesto un gradiente de presión constante de 40 pulgadas de columna de agua (9956.8 Pa) para todos los casos. El fluido considerado fue aire a 20 °C con viscosidad cinemática  $\nu = 1,5 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s.

Si bien se trata de un cálculo con malla fija dado que en cada posición de la válvula la frontera del dominio permanece inmóvil, se aplicó la estrategia de movimiento de mallas presentada en la sección anterior en la forma en que se explica a continuación. Se partió de una malla base con la válvula ubicada en la posición correspondiente a una alzada de 5 mm. Las mallas correspondientes a otro valor de alzada de la válvula fueron obtenidas moviendo el contorno de la válvula hasta la posición deseada y aplicando la estrategia de movimiento para posicionar los nodos interiores de la grilla.

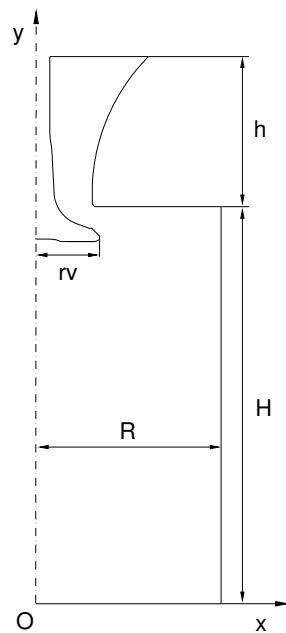


Figura 1: Esquema de la geometría del ujómetro.

Se utilizó una malla con 12133 elementos triangulares y 6394 nodos, con un  $h$  del orden de 0.2 mm. en la zona de la válvula y el asiento. En la Figura 2(b) se presenta un detalle de la malla empleada. Las instancias (a) y (c) de la misma figura presentan una porción de la malla deformada para dos posiciones de la válvula. Toda la secuencia de mallas fue obtenida empleando, de acuerdo con la ecuación 5,  $C_v = 0$ ,  $C_q = 1$  y  $n = -1$ .

Debido a que no se alcanza un estado estacionario, se adoptó como criterio de parada para cada ujómetro a el instante en que el caudal presenta un comportamiento “cuasi-periódico”, con variaciones respecto de la media que no superen el 1%.

Las figuras 3 y 4 ilustran algunos de los resultados obtenidos. En la primera puede observarse el módulo de la velocidad para varias alzadas, mientras que en la segunda se presenta el campo de presión correspondiente.

Debido a que la densidad se asume constante, se determina el caudal volumétrico ujado para cada alzada simplemente como

$$Q = 2\pi \int_{r_i}^{r_e} v(r)r dr \quad (6)$$

donde  $v$  es la componente de la velocidad según la dirección  $y$ .

Para cada ujómetro a estática el caudal fue calculado como el promedio de los caudales en el último de los cuasi-períodos de la curva de caudal en función del tiempo. La Figura 5 presenta los resultados obtenidos.

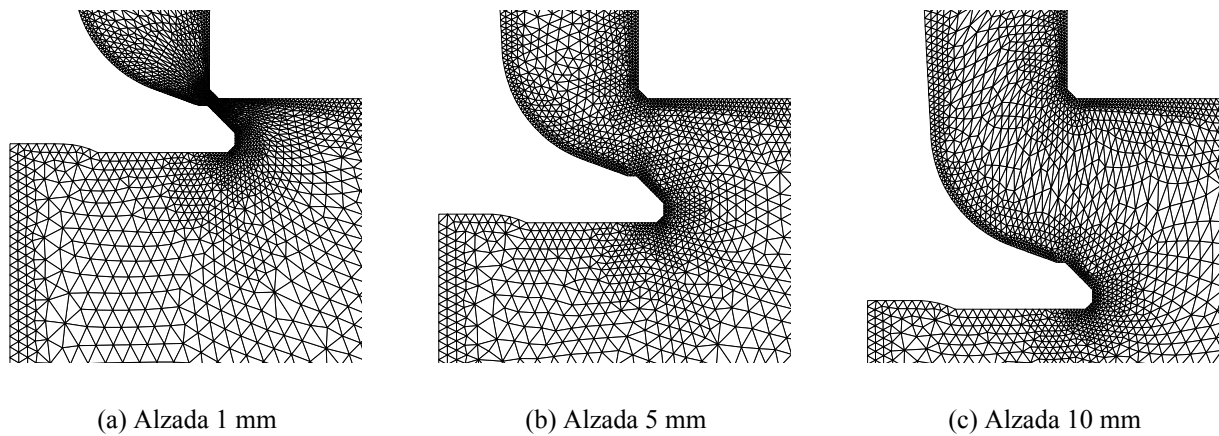
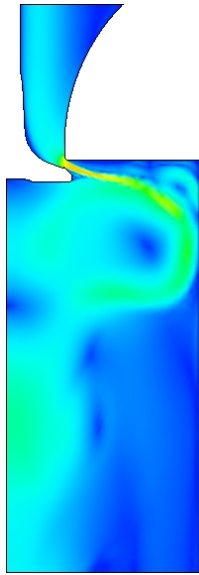


Figura 2: Detalle de la malla utilizada.

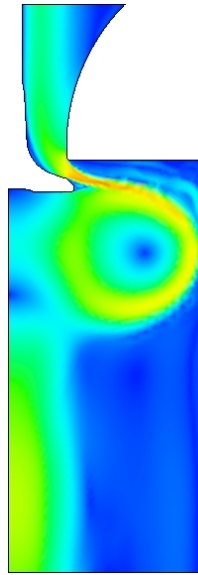
#### 4.2. Flujometría axisimétrica dinámica

La resolución de una flujometría dinámica implica determinar el flujo con la válvula animada de cierto movimiento impuesto. El recorrido de la válvula deberá estar comprendido entre una alzada nula, correspondiente al momento del cierre donde se produce el contacto válvula-asiento, y la alzada máxima impuesta. El instante de cierre implica un problema para la estrategia numérica empleada, dado que si se produce el contacto entre dos porciones de la frontera del dominio de cálculo los elementos de la malla ubicados en esa zona sufrirán un “aplastamiento” pudiendo adquirir algunos un volumen nulo. Una forma de remediar este inconveniente sería apelar a una estrategia de remallado, con todos los problemas conocidos que ésta implica. Nuestro principal objetivo consiste en poder realizar el cálculo sin apelar en ningún momento al remallado. Por lo tanto no permitimos que la válvula cierre completamente, sino sólo que se aproxime su cientemente al asiento evitando el contacto, de tal forma que por fricción viscosa pueda aproximarse el cierre con el caudal fijado tendiendo a cero. La distancia mínima entre la válvula y el asiento debe fijarse teniendo en cuenta dos aspectos del problema que se contraponen. Por un lado la distancia entre la válvula y el asiento tendrá que ser la menor posible para que el cierre buscado esté aproximado adecuadamente. Por otro se encuentra el hecho de que a mayor aproximación entre la válvula y el asiento, mayor es la distorsión de los elementos en esa zona, lo cual implica mayores errores en la solución obtenida. Este último inconveniente se debe a la estrategia aplicada para el movimiento de la malla, consistente en deformar una malla base generada para una alzada de válvula media entre la máxima y la mínima.

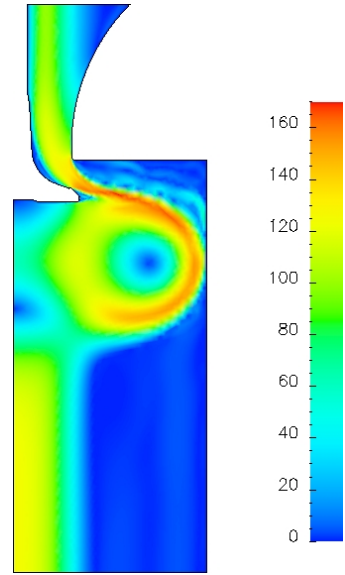
Otro aspecto interesante de este tipo particular de problemas de interacción fluido estructura, en los cuales la frontera no se deforma por acción del fluido sino por una ley impuesta, es la posibilidad de generar las mallas necesarias en forma anticipada. De este modo, el programa de cálculo puede acceder a la malla para un instante dado a través de la lectura de un archivo. Para minimizar la cantidad de lecturas de mallas se utilizó un conjunto de mallas reducido espaciadas



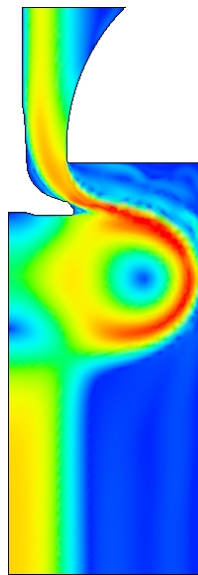
(a) Alzada 2 mm.



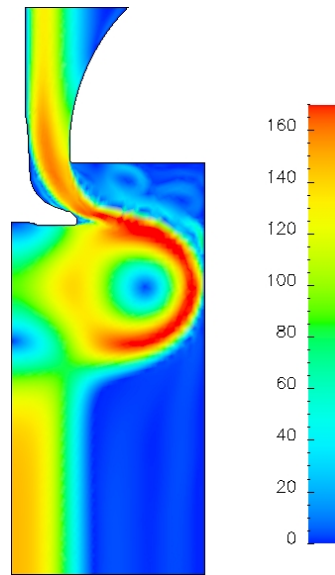
(b) Alzada 4 mm.



(c) Alzada 6 mm.



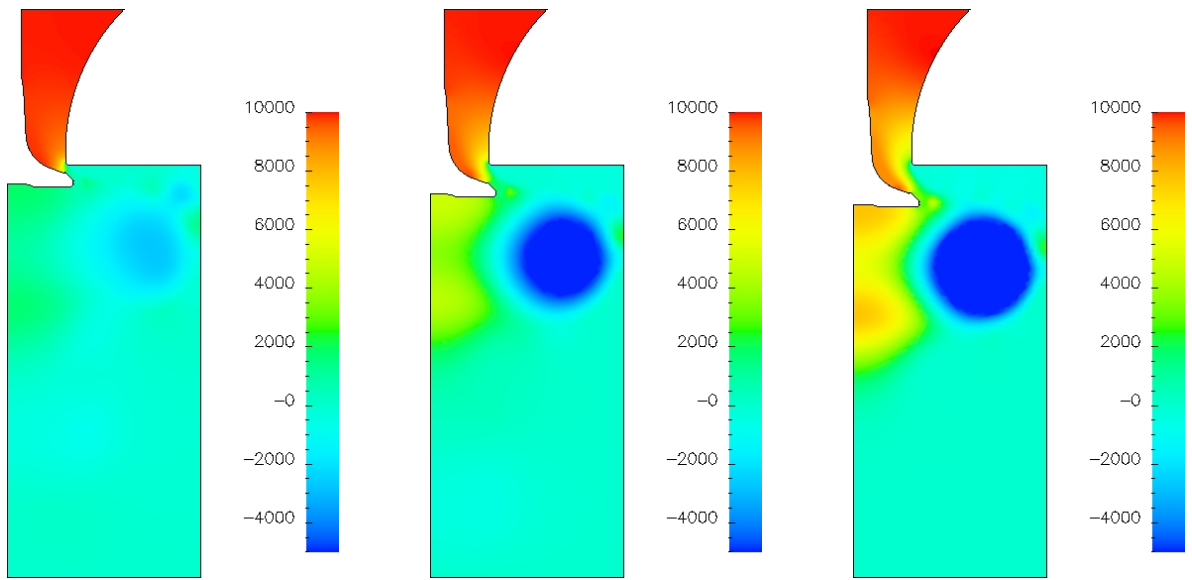
(d) Alzada 8 mm.



(e) Alzada 10 mm.

Figura 3: Módulo de la velocidad en m/s - Flujo métrica estática.

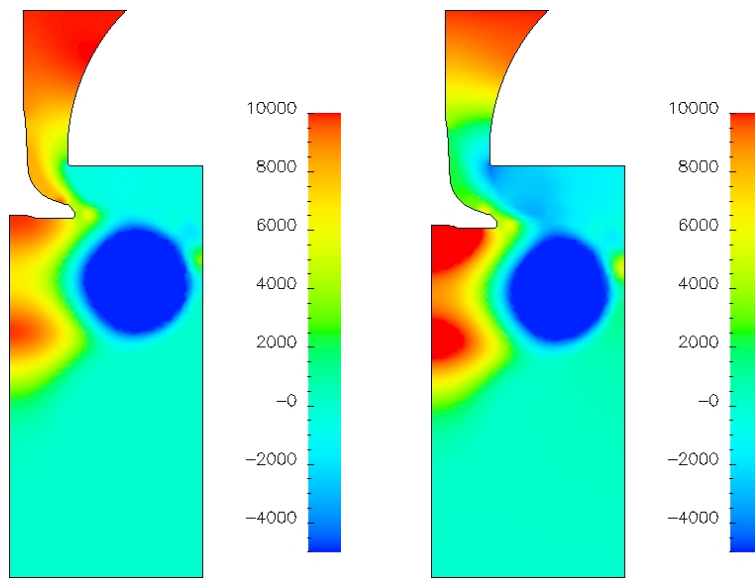




(a) Alzada 2 mm.

(b) Alzada 4 mm.

(c) Alzada 6 mm.



(d) Alzada 8 mm.

(e) Alzada 10 mm.

Figura 4: Campo de presión en Pa - Flujo métr'a estática.

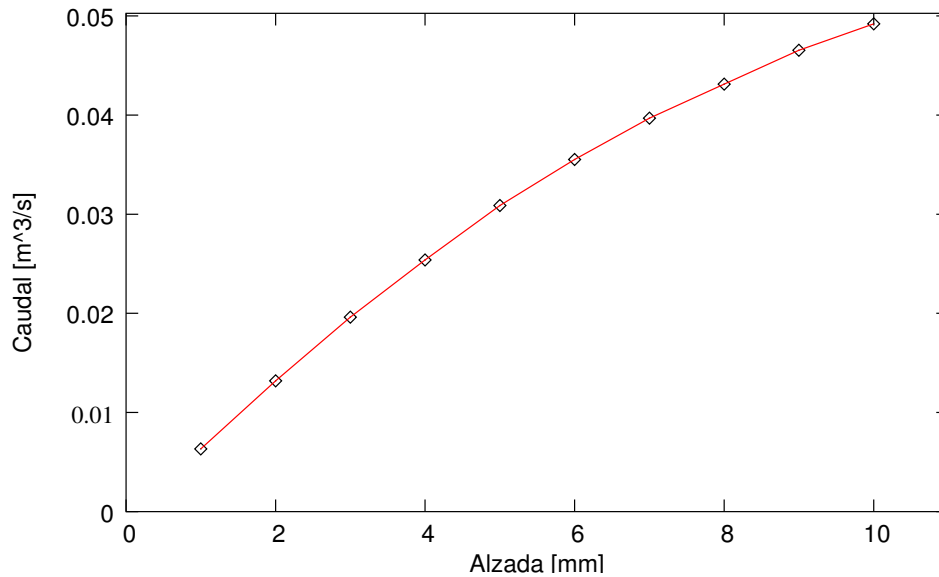


Figura 5: Caudal - Flujo métr'a estática.

temporalmente por intervalos mayores a los de cálculo, interpolando para un instante dado las coordenadas nodales de las dos mallas consecutivas correspondientes.

La malla empleada para esta simulación dinámica fue la misma que la utilizada en la flujo métr'a estática. El cierre fue aproximado con la válvula en una posición correspondiente a una alzada de 0.08 mm.

La ley de alzada  $Lv$  impuesta sobre la válvula fue

$$Lv(t) = \frac{Lv_{max}}{2}[1 - \cos(\omega t)] \quad (7)$$

siendo  $Lv_{max} = 9.92$  mm. la alzada máxima y  $\omega = 2\pi/T$ , con  $T = 1/200$  el período del movimiento.

En total fueron simulados 6 períodos, lo cual se consideró suficiente dado que no se observó una variación significativa del caudal al comparar entre los últimos ciclos. La Figura 6 ilustra el módulo de la velocidad para distintas alzadas a lo largo del último ciclo simulado.

En la Figura 7 se representa la variación del caudal volumétrico durante todo el período calculado.

### 4.3. Comparación de resultados

Los simuladores de motores que emplean modelos 0-1 D resultan útiles para predecir la performance global de un motor de combustión interna con bajo requerimiento de recursos computacionales. Debido a la simplificación introducida en esos modelos, en general existen parámetros que deben ajustarse experimentalmente o a través de simulaciones tridimensionales. En particular, a los modelos para las válvulas del motor se les debe proveer del denominado

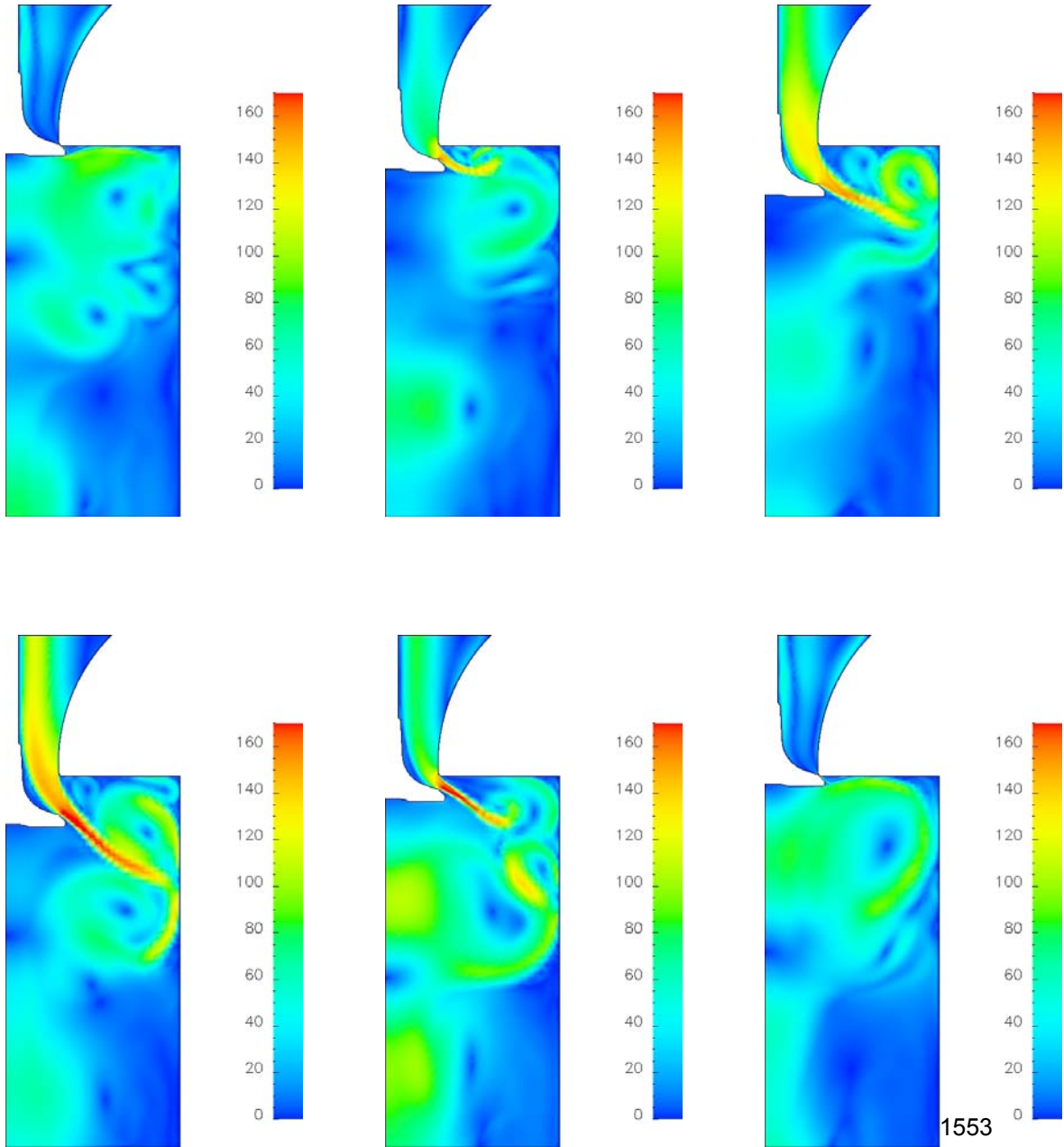


Figura 6: Módulo de la velocidad en m/s - Flujometría dinámica.

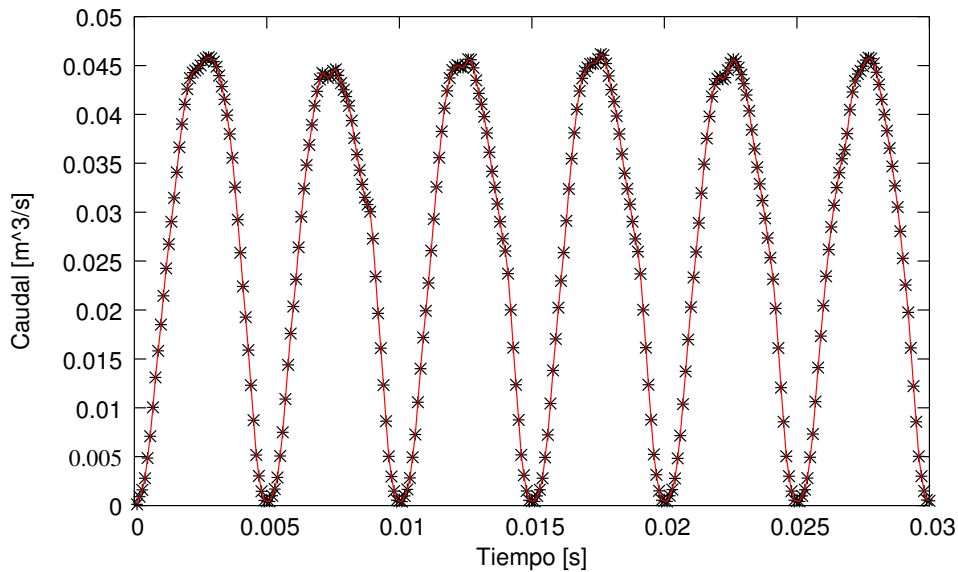


Figura 7: Variación del caudal para ujometr 'a dinámica.

coeficiente de descarga  $C_d$  en función de la alzada de la válvula. Este coeficiente se define como la relación entre los flujos de masa real  $\dot{m}_r$  e ideal  $\dot{m}_i$  a través de la válvula

$$C_d = \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_i} \quad (8)$$

Generalmente este coeficiente es medido en ujómetros en forma estática y utilizado en simulaciones de carácter dinámico. Un aspecto que interesa estudiar es hasta qué punto es correcto utilizar un coeficiente determinado en forma estática en un problema dinámico. Por tal motivo, esta sección está dedicada a comparar los caudales arrojados por los ujómetros 'as estática y dinámica.

Para poder comparar directamente con el caso estático, el caudal ujado en forma dinámica fue obtenido promediando los caudales entre los caudales calculados cada vez que la válvula se ubicó en alguna de las posiciones correspondientes a los tests estáticos a lo largo de todos los ciclos simulados. En la Figura 8 se hallan superpuestas las curvas del caudal en función de la alzada para los casos dinámico y estático. De acuerdo con esa gráfica, no se observa una diferencia significativa entre los dos tipos de ensayos. Sin embargo, debido a las simplificaciones realizadas en el presente test, los resultados obtenidos no deberán ser concluyentes en cuanto al objetivo planteado.

## 5. CÁMARA DEL MOTOR MWM

El siguiente caso que se planteó resolver fue considerar la geometría tridimensional de un motor real para realizar una ujometría virtual. Para tal fin se adoptó la geometría del motor MWM, la cual puede observarse en la Figura 9.

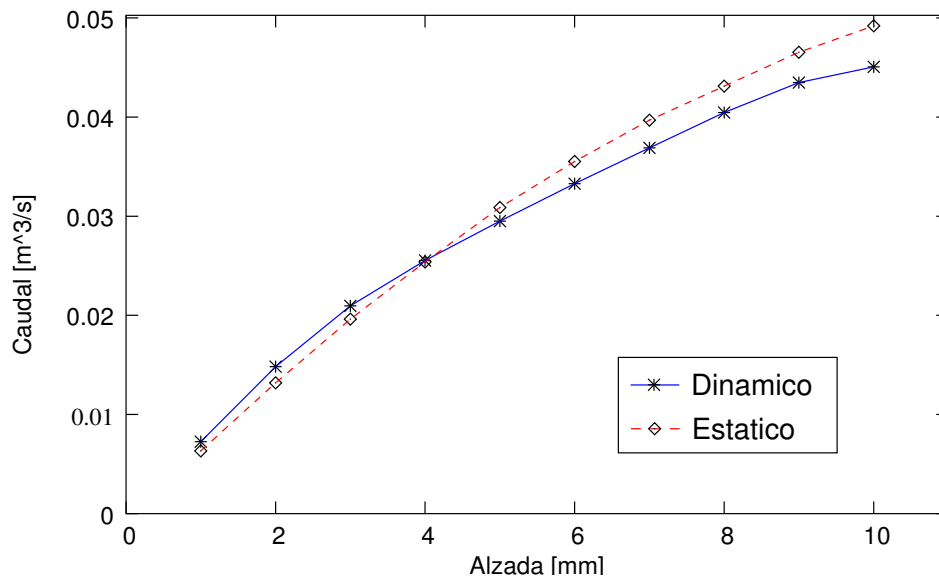


Figura 8: Comparación de caudales ujometrías estática y dinámica.

Actualmente se está trabajando sobre este caso, habiéndose obtenido los primeros resultados para una ujometría estática. Debido a que estos resultados son recientes, no se han realizado análisis de los mismos y son incluidos en el presente trabajo sólo a modo ilustrativo (véanse figuras 10 y 11).

## 6. CONCLUSIONES

Con el objetivo de realizar ujometrías dinámicas virtuales en motores de combustión interna fueron testeadas las herramientas desarrolladas para tal fin. Se propuso una estrategia para resolver la CMD en problemas donde el dominio posee fronteras móviles. La estrategia se basa en la resolución de un problema de optimización, planteada como un funcional relacionado con la calidad buscada para la malla deformada. Esta técnica mantiene inalterada la topología inicial de la malla reubicando en cada instante las coordenadas nodales de acuerdo al óptimo consignado.

Se realizaron ujometrías virtuales estáticas y dinámicas en un dispositivo con geometría axisimétrica asimilable en funcionamiento a un ujómetro. Se calcularon en cada caso los caudales ujadados, comparándose los resultados obtenidos entre cada tipo de test. Además, fueron presentados los primeros resultados obtenidos de una ujometría estática para la cámara del motor MWM.

Los casos resueltos sirvieron para comenzar a testear las herramientas desarrolladas, en particular la técnica de movimiento de mallas. Se plantea como trabajo a futuro la realización de ujometrías dinámicas considerando geometrías tridimensionales de motores de combustión interna, como por ejemplo el motor MWM.

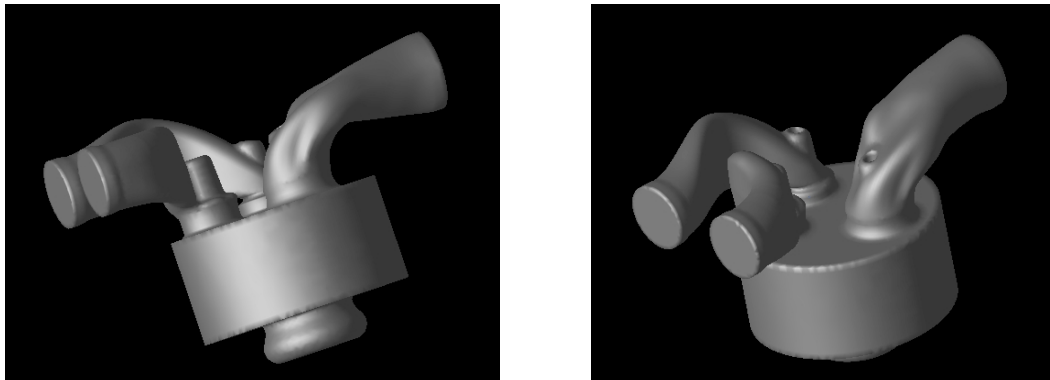


Figura 9: Geometría de la cámara del motor MWM.

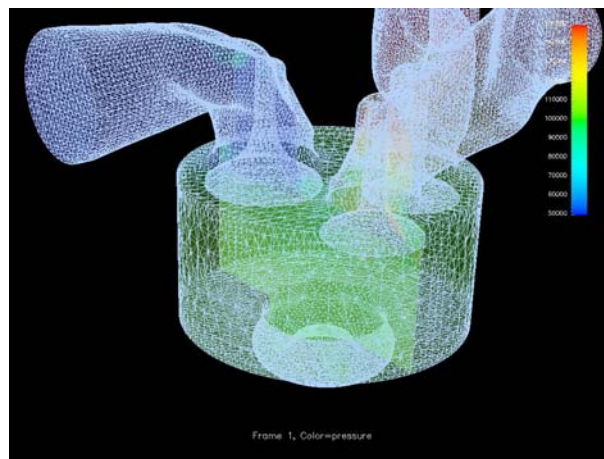


Figura 10: Vista de la malla empleada para el cálculo.

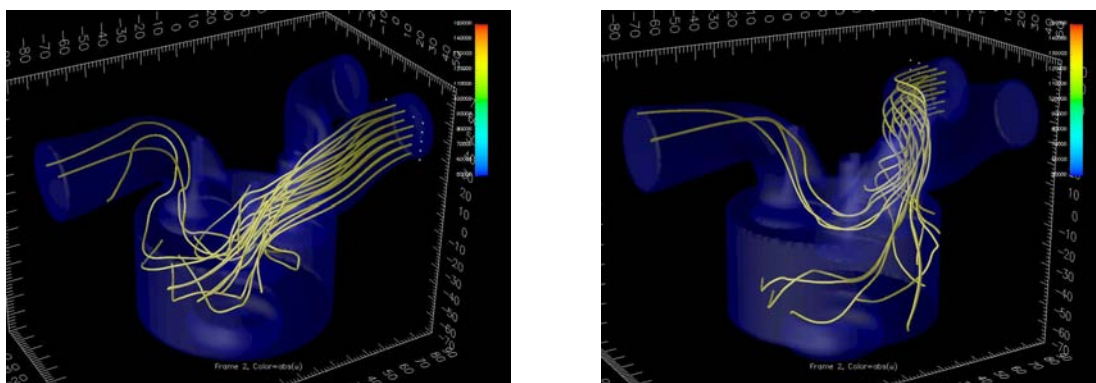


Figura 11: Líneas de corriente.

## REFERENCIAS

- [1] B. Koobus and C. Farhat. Second order time-accurate and geometrically conservative implicit schemes for flow computations on unstructured dynamic meshes. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **170**, 103–129 (1999).
- [2] C. Farhat, P. Geuzaine, and C. Grandmont. The discrete geometric conservation law and the nonlinear stability of ALE schemes for the solution of flow problems on moving grids. *J. of Computational Physics*, **174**, 669–694 (2001).
- [3] C. Farhat and P. Geuzaine. Design and analysis of robust ALE time-integrators for the solution of unsteady flow problems on moving grids. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **193**, 4073–4095 (2004).
- [4] C. Farhat, C. Degand, B. Koobus, and M. Lesoinne. Torsional springs for two-dimensional dynamic unstructured fluid meshes. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **169**, 231–245 (1998).
- [5] C.O. Burg. A robust unstructured grid movement strategy using three-dimensional torsional springs. *34<sup>th</sup> AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit - AIAA Paper 2004-2529*, (2004).
- [6] K. Stein, T. Tezduyar, and R. Benney. Automatic mesh update with the solid-extension mesh moving technique. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **193**, 2019–2032 (2004).
- [7] P.Z. Bar-Yoseph, S. Mereu, S. Chippada, and V.J. Kalro. Automatic monitoring of element shape quality in 2-D and 3-D computational mesh dynamics. *Computational Mechanics*, **27**, 378–395 (2001).
- [8] F.J. Blom. Considerations on the spring analogy. *Numerical Methods in Fluids*, **32**, 647–668 (2000).
- [9] G. Chiandussi, G. Bugeda, and E. Oñate. A simple method for automatic update of finite element meshes. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, **16**, 1–19 (2000).
- [10] P. Kjellgren and J. Hyvärinen. An arbitrary Lagrangean-Eulerian finite element method. *Computational Mechanics*, **21**, 81–90 (1998).
- [11] R. Löhner and C. Yang. Improved ALE mesh velocities for moving bodies. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, **12**, 599–608 (1996).
- [12] N. Nigro, M. Storti, S. Idelsohn, and T. Tezduyar. Physics based GMRES preconditioner for compressible and incompressible Navier-Stokes equations. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **154**, 203–228 (1998).
- [13] V. Sonzogni, A. Yommi, N. Nigro, and M. Storti. A parallel finite element program on a Beowulf cluster. *Advances in Engineering Software*, **33**, 427–443 (2002).
- [14] S. Idelsohn, M. Storti, N. Nigro, and G. Buscaglia. A Petrov-Galerkin formulation for advection-reaction-diffusion problems. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **136**, 27–46 (1996).
- [15] M. Storti, N. Nigro, and Paz R. PETSc-FEM: a general purpose, parallel, multi-physics FEM program.
- [16] T. Tezduyar, S. Mittal, S. Ray, and Shih R. Incompressible flow computations with sta-

- bilized bilinear and linear equal order interpolation velocity-pressure elements. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **95**, 221–242 (1992).
- [17] M. Storti, L. Dalcin, R. Paz, A. Yommi, V. Sonzogni, and N. Nigro. An interface strip preconditioner for domain decomposition methods. *submitted to Advances in Engineering Software*, (2004).
- [18] M. Storti and R. Paz. An interface strip preconditioner for domain decomposition methods: application to hydrology. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, **62**, 1873–1894 (2005).
- [19] E. López, J. Toth, and N. Nigro. Técnicas para definir la cinemática de mallas adaptables a dominios con fronteras móviles. *Mecánica Computacional*, **23**, 3251–3271 (2004).